



УТВЕРЖДАЮ  
Директор ИТ СО РАН  
академик РАН Маркович Д.М.

«02» октября 2025 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины» выполнена Суловым Даниилом Андреевичем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Соискатель Сулов Даниил Андреевич, 1997 года рождения, в 2021 году окончил с отличием Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки 03.04.02 «Физика», присуждена квалификация магистр. В период подготовки диссертации работал с 2021 г. в лаборатории проблем теплопереноса ИТ СО РАН в должности инженера-исследователя, а с 2024 г. работает в должности младшего научного сотрудника. В период с 2021 по настоящее время Сулов Даниил Андреевич обучается в аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, научная специальность – 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы. Кандидатские экзамены по научной специальности 1.1.9 «Механика жидкости, газа и плазмы» сданы во время обучения в аспирантуре в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, все оценки «отлично».

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Шторк Сергей Иванович работает заведующим лабораторией проблем теплопереноса ИТ СО РАН.

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

### **Общая характеристика работы**

Диссертация Сулова Даниила Андреевича представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены результаты исследований, совокупность которых можно квалифицировать как новые научные достижения в области механики жидкости и газа, а именно, в части управления характеристиками крупномасштабных вихрей в нестационарных закрученных турбулентных потоках. Полученные результаты и сформулированные выводы обладают внутренним единством изложения результатов выполненных исследований. В диссертации, помимо прочего, приведены рекомендации по использованию научных выводов. Предложенные автором диссертации решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями. Оформление

и стиль написания диссертации отвечают требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

#### **Актуальность темы исследования**

Потребность населения Земли в электроэнергии возрастает ежедневно, при этом сокращаются запасы невозобновляемых источников энергии. Для обеспечения стабильного производства электроэнергии необходимо компенсировать непостоянный вклад зависимых от погоды ветряных и солнечных электростанций. Гидроэлектростанции (ГЭС) являются наиболее подходящим возобновляемым источником энергии, который обеспечивает возможность гибкого управления выработкой электроэнергии. Однако, частое регулирование режимов работы гидротурбины, исходя из объема необходимой энергии, приводит к работе в неоптимальных или нерасчетных режимах. В таких режимах поток, сходящий с кромок рабочего колеса турбины Френсиса, имеет большую остаточную закрутку (значительную тангенциальную составляющую вектора скорости) и чрезвычайно восприимчив к возмущениям. В совокупности с расширяющейся частью отсасывающей трубы гидротурбины это приводит к формированию в потоке мощного прецессирующего вихревого ядра (ПВЯ) спиральной формы, генерирующего значительные периодические пульсации давления в проточном тракте. Возникающие пульсации давления являются чрезвычайно опасными из-за возможности резонанса с собственными частотами колебаний, а также являющиеся источником нежелательных колебаний мощности самой турбины. Резкое увеличение амплитуды пульсаций давления может привести к повреждению гидроагрегата из-за усталости металла конструкций. ПВЯ может угрожать безопасности и надежности работы всей конструкции гидроэлектростанции. В этой связи актуальным является расширение режимов устойчивой и безопасной работы гидротурбин путем управления ПВЯ. Данное управление позволит снизить негативное влияние вихревых структур на безопасность и надежность работы гидроагрегатов, расширить доступный диапазон режимов. Для создания системы управления требуется понимать структуру закрученного течения в проточной части гидротурбины, а также понимать то, как именно предлагаемая методика управления воздействует на характеристики ПВЯ.

Существующие способы управления ПВЯ разделяются на активные и пассивные. Пассивные способы управления, как правило, основываются на обребрении отсасывающей трубы, работают в узком диапазоне режимов гидротурбины, а вблизи оптимального режима могут снижать КПД турбины. Активное управление можно подстраивать под конкретный режим и под характеристики ПВЯ. Наибольшее распространение получило активное управление с помощью подачи струй воды через центр тела обтекания рабочего колеса. Расход струй должен составлять порядка 10% расхода основной среды, чтобы существенно снизить амплитуду пульсаций от вихревого жгута. При таком высоком расходе струй существенная доля потока идет мимо рабочего колеса, т.е. снижается эффективность турбины. Соответственно, актуальной задачей является снижение требуемого управляющего расхода для подавления ПВЯ и пульсаций давления, вызываемых им. Также отметим, что диаметр струй и их пространственная ориентация, значительно влияют на эффективность подавления ПВЯ. При этом, в литературе почти нет систематических сведений о влиянии вышеуказанных параметров на характеристики ПВЯ в гидротурбине.

Помимо этого, почти не изучено, как именно управляющее воздействие влияет на глобальные характеристики закрученного потока, а не только на амплитуду пульсаций давления. Отсутствует понимание физических механизмов стабилизации потока при воздействии управляющих струй, а также не найдены обобщающие зависимости для описания эволюции характеристик вихревых структур под действием системы управления потоком. Все вышеперечисленное обуславливает поставленные цель и задачи в диссертационной работе, а тема диссертационной работы является актуальной.

**Цель работы:**

установление физических закономерностей воздействия активного управления на прецессирующее вихревое ядро в закрученном потоке за рабочим колесом модельной гидротурбины Френсиса и разработка на их основе эффективного метода подавления пульсаций давления.

**Поставлены и решены следующие задачи:**

– Модернизировать экспериментальный стенд. Установить и настроить систему инъекции дополнительного управляющего расхода. Спроектировать актуаторы (инжекторы) для управления потоком. Адаптировать оборудование для диагностики потока под условия экспериментов.

– Провести комплекс экспериментальных исследований по воздействию инжектируемых струй на параметры ПВЯ в режимах работы турбины с повышенными пульсациями давления. Сформировать базу данных пространственно-временных характеристик течения.

– Установить основные безразмерные параметры, определяющие эффективность управления. Построить качественные обобщающие зависимости для описания эволюции характеристик вихревых структур под воздействием управления.

– Количественно оценить изменение осреднённых и пульсационных характеристик течения под воздействием системы управления и выявить физические механизмы стабилизации потока.

– Предложить научно-обоснованный подход по выбору оптимальных параметров управления и конфигурации устройства для его реализации в задачах эффективного подавления ПВЯ и снижения динамических нагрузок на конструкции гидротурбин.

**Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов, изложенных в диссертации:**

Вклад автора заключается в модернизации аэродинамического стенда, системы управления потоком, адаптации измерительного оборудования к условиям экспериментов, написании компьютерных программ, проведении экспериментальных исследований закрученного потока, обработке и анализе экспериментальных данных, а также в подготовке публикаций в рецензируемых журналах, патентов, научных докладов. Постановка задач и основные методы исследования были сформулированы соискателем совместно с научным руководителем, д.ф.-м.н. С. И. Шторком. Основные научные результаты и выводы, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно. Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены лично автором. В совместных публикациях вклад автора равнозначный.

### **Научная новизна:**

– С опорой на результаты линейного анализа устойчивости, совместно с проведенными экспериментами, впервые предложен и обоснован с физической точки зрения оптимальный способ подачи и коэффициент потока импульса струй для наиболее эффективного подавления ПВЯ в гидротурбине. Данное исследование отличается от традиционного подхода (Altimemy et al., 2019; Bosioc et al., 2012; Khullar et al., 2022; Kirschner et al., 2010; Shtork et al., 2023; Štefan et al., 2017; Tănasă et al., 2013), когда управление ПВЯ осуществляется с помощью метода проб и ошибок или физической интуиции.

– Проведено сравнение различных способов подачи струй с целью управления вихревыми структурами. Впервые комплексно показано влияние инъекции струй на пространственные и временные характеристики ПВЯ.

– Механизмы управления вихревыми структурами впервые описаны на основе одновременного анализа пульсаций давления и распределения скоростей за рабочим колесом.

– Показано, что безразмерный коэффициент потока импульса является ключевой характеристикой, определяющей эффективность воздействия управления на ПВЯ.

### **Теоретическая и практическая значимость работы:**

– Установлены фундаментальные закономерности взаимодействия управляющих струй с закрученным потоком и разработан эффективный метод для повышения эксплуатационной надежности и безопасности гидротурбин. Результаты исследования лягут в основу инженерно-технического решения по управлению ПВЯ за рабочим колесом гидротурбины, что подтверждается патентом на изобретение № 2831741 «Способ подавления пульсаций давления в гидротурбине», патентообладатель – ИТ СО РАН.

– Результаты приводят к дальнейшему развитию научных основ управления нестационарными течениями в иных энергетических приложениях, например, для снижения вредных выбросов в горелочных устройствах, использующих закрутку потока для стабилизации горения.

– Накопленные обширные экспериментальные данные с одновременной фиксацией пульсаций давления и распределений скоростей за рабочим колесом модельной гидротурбины в различных режимах работы могут быть использованы для верификации численных расчетов течения за рабочим колесом.

– Экспериментальные данные о распределении скоростей могут быть использованы для верификации аналитической модели винтового вихря с ядром конечного размера (Алексеенко и др., 2003; Kuibin et al., 2014) и необходимы для её дальнейшего развития.

– Тематика работы полностью соответствует Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145), пункт 21 б. Помимо этого, тематика диссертационного исследования полностью относится к приоритетному направлению НТР «высокоэффективная и ресурсосберегающая энергетика» (Указ Президента Российской Федерации от 18.06.2024 г. № 529).

**Степень достоверности результатов проведенных соискателем ученой степени исследований:** достоверность полученных результатов обеспечивалась использованием современных хорошо зарекомендованных измерительных методик (лазерная доплеровская анемометрия, анемометрия по изображениям частиц), предварительной

настройкой и калибровкой оборудования, проведением тестовых измерений, а также воспроизводимостью результатов с учетом рассчитанных погрешностей и сопоставлением с результатами других исследователей.

**Диссертация соответствует требованиям, установленным пунктом 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842.**

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени:**

Основные научные результаты диссертации достаточно полно отражены в следующих работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Suslov D. A.**, Skripkin S. G., Shtork S. I. Effect of multi-jet flow control on the vortex core in a simplified Francis turbine model // *Physics of Fluids*. – 2025. – Vol. 37. – №. 9. – 095116. -13 p.
2. **Суслов Д. А.**, Скрипкин С. Г., Шторк С. И. Использование модели Скалли для определения параметров вихревого ядра в гидротурбине Френсиса // *Письма в журнал технической физики* – 2025. – Т. 51. – №. 17. – С. 12-16.
3. **Суслов Д. А.**, Скрипкин С. Г., Цой М. А., Гореликов Е. Ю., Шторк С. И. Активное управление вихревыми структурами за рабочим колесом модели гидротурбины Френсиса // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2024. – Т. 31. – №. 4 – С. 803-815.
4. **Suslov D.**, Srkipkin S., Shtork S. Features of the precessing vortex control in the Francis turbine model via jet injection // *E3S Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2024. – Vol. 578. – P. 01035. -6 p.
5. Litvinov I., **Suslov D.**, Tsoy M., Gorelikov E., Shtork S., Alekseenko S., Oberleithner K. Active control of the vortex induced pressure fluctuations in a hydro turbine model via axial and radial jets at the crown tip // *International Journal of Fluid Machinery and Systems*. – 2023. – Vol. 16. – №. 4. – P. 320-331.
6. Shtork S., **Suslov D.**, Skripkin S., Litvinov I., Gorelikov E. An overview of active control techniques for vortex rope mitigation in hydraulic turbines // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – №. 13. – P. 5131.
7. **Suslov D.**, Litvinov I., Gorelikov E., Shtork S., Wood D. Laboratory modeling of an axial flow micro hydraulic turbine // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. – №. 2. – P. 573.
8. Skripkin S. G., **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Tsoy M. A., Shtork S. I. Comparative analysis of air and water flows in simplified hydraulic turbine models // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2022. – Vol. 2150. – №. 1. – P. 012001.
9. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Гореликов Е. Ю. Сравнительный анализ пульсаций давления, вызванных спирально-вихревыми структурами в проточной части модели гидротурбины // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. – 2021. – Т. 21. – №. 3. – С. 49-56.
10. Litvinov I., **Suslov D.**, Gorelikov E., Shtork S. Experimental Study of Transient Flow Regimes in a Model Hydroturbine Draft Tube // *Energies*. – 2021. – Vol. 14. – №. 5. – P. 1240.

11. **Suslov D.A.**, Litvinov I.V., Gorelikov E.U., Shtork S.I. The swirl number as a method for determining the optimal operating mode of the micro hydro turbine //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 2119. – №. 1. – P. 012160.
12. Litvinov I. V., **Suslov D. A.**, Gorelikov E. U., Shtork S.I. Swirl number and nozzle confinement effects in a flat-vane axial swirler //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2021. – Vol. 91. – P. 108812.
13. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Гореликов Е. Ю., Шторк С. И. Поиск оптимальных режимов работы посредством изучения полей скорости в воздушной модели микрогидротурбины //Сибирский физический журнал. – 2020. – Т. 15. – №. 2. – С. 73-83
14. **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Shtork S. I. Frequency response of swirl flow behind an axial swirler //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Vol. 2211. – №. 1. – P. 030012.
15. **Suslov D. A.**, Litvinov I. V., Gorelikov E. U., Shtork S. I. Transient phenomena in the draft tube model of a Francis hydro-turbine //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1359. – №. 1. – P. 012016.
16. **Суслов Д. А.**, Литвинов И. В., Шторк С. И., Гореликов Е. Ю. Влияние переходных режимов на нестационарные вихревые явления в модели отсасывающей трубы гидротурбины //Сибирский физический журнал. – 2019. – Т. 14. – №. 4. – С. 55-68.
17. Litvinov I., **Suslov D.**, Gorelikov I., Sadbakov O., Shtork S. Swirl number analysis in the air hydro-turbine model //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2018. – Vol. 2027. – №. 1. – P. 040057.

**Ценность научных работ соискателя ученой степени** оценивается как высокая, учитывая большое количество работ, а именно, 4 публикации из вышеприведенного перечня, в рецензируемых журналах первого квартиля по данным международной реферативной базы данных и системы цитирования «Scopus». Высокая ценность научных работ соискателя ученой степени также подтверждается тем, что из вышеприведенного перечня публикаций 3 статьи опубликованы в журналах 1 уровня «Белого списка» РЦНИ, и 5 статей в журналах 2 уровня «Белого списка» РЦНИ.

**По теме диссертации имеются патенты и свидетельства:**

1. **Суслов Д.А.**, Скрипкин С.Г., Гореликов Е.Ю., Цой М.А., Шторк С.И. «Способ подавления пульсаций давления в гидротурбине». Патент на изобретение № 2831741 от 12.12.2024 г.
2. **Суслов Д.А.**, Литвинов И.В. «Программа для анализа синхронной и асинхронной составляющей, разложения на азимутальные моды пульсаций давления, вызванных спирально-вихревыми структурами». Свидетельство о регистрации программы ЭВМ № 2021666229 от 11.10.2021 г.
3. Гореликов Е. Ю., Литвинов И.В., **Суслов Д. А.**, Шторк С.И. «Стенд для моделирования режимов течения в отсасывающей трубе гидротурбины». Патент на полезную модель № 202408 от 16.02.2021 г.

**Апробация работы:**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на ведущих российских и международных конференциях: Международная научная студенческая

конференция (Новосибирск, 2019, 2020, 2021, 2022), «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2019; Сочи, 2022), «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (Новосибирск, 2020), «Оптические методы исследования потоков» (Москва, 2019, 2021), «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках» (Рыбинск, 2019), «Наука будущего – наука молодых» (Новосибирск, 2022), Сибирский теплофизический семинар (Новосибирск, 2022, 2023, 2024, 2025), «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2024), «Семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям жидкости, газа и плазмы» (Санкт-Петербург, 2025).

**Соответствие содержания диссертации избранной специальности:**

Диссертация является завершённой научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 1.1.9 - Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки) по пункту 13 «Струйные течения и кавитация» и по пункту 14 «Гидродинамическая устойчивость».

**Решение о рекомендации работы к защите:**

Диссертация «Управление характеристиками прецессирующих вихрей в проточной части модели гидротурбины» Сулова Даниила Андреевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Заключение принято на заседании секции 5 «Теплофизические основы энергетики (включая горение)» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством академика РАН, научного руководителя ИТ СО РАН Алексеенко Сергея Владимировича. Присутствовало на заседании 14 чел., в том числе 1 академик РАН, 1 член-корреспондент РАН, 11 докторов наук, 1 кандидат наук. Результаты голосования: «за» - 14 человек, «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 25-2025 от «25» сентября 2025 г.

Председатель заседания секции 5  
Учёного совета ИТ СО РАН, академик РАН,  
научный руководитель ИТ СО РАН



Алексеенко С. В.

Секретарь заседания секции 5  
Учёного совета ИТ СО РАН, кандидат технических наук,  
ведущий научный сотрудник  
лаборатории физических основ  
энергетических технологий ИТ СО РАН



Лукашов В. В.

Подписи Алексеенко С. В. и Лукашова В. В. заверяю.  
Ученый секретарь ИТ СО РАН,  
кандидат физико-математических наук



Ягодницына А. А.